

ВОЗМОЖНОСТИ НАЗЕМНОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО НЕКОНТРОЛИРУЕМЫМ ИЗЛУЧЕНИЯМ

С.В. Козелков, А.Н. Явтушенко, С.Д. Ставицкий
(Национальная академия обороны Украины, Киев)

Представлен анализ проведения идентификации космических аппаратов по неконтролируемым излучениям (НКИ) гетеродинов приемного тракта и задающих генераторов бортовой аппаратуры космических аппаратов.

космический аппарат, неконтролируемое излучение, приемный тракт

Введение. Расширение знаний по развитию одного из основных видов космической деятельности, а именно идентификации космических аппаратов (КА) наземными радиотехническими системами является актуальной задачей, реализация которой проводится в рамках Национальной (Государственной) космической программы Украины на 2003 – 2007 гг.

Под идентификацией КА (в полете) понимается процесс, устанавливающий соответствие распознаваемого КА своему образцу, а именно данным об этом КА, имеющимся в центре обработки информации.

Анализ литературы. Как показал анализ [1 – 4] для идентификации КА целесообразно использовать результаты постоянно функционирующих блоков бортовой аппаратуры (ББА) КА, выбрав их характеристиками неконтролируемые излучения (НКИ), так называемые “просачивающиеся” через антенные системы КА. В частности, в качестве таких блоков могут использоваться гетеродины и задающие генераторы приемного тракта радиотехнического комплекса (РТК) КА.

Проведение идентификации космических аппаратов по НКИ гетеродинов приемного тракта и задающих генераторов подразумевает измерение характера изменения параметров колебаний гетеродинов и выделяет признаки, отличающие колебания одного генератора от другого. Поскольку НКИ гетеродинов является гармоническими колебаниями, то параметрами данных сигналов является амплитуда, частота и начальная фаза. Использование для целей идентификации амплитуды сигнала и начальной фазы не представляется возможным, так как на данные параметры сильно влияет среда распространения. Наиболее информативной для целей идентификации является частота колебания, а точнее, характер изменения частоты во времени. Такое изменение связано с нестабильностью частоты бортовых задающих генераторов

ров (ЗГ). Характер изменения частоты зависит от поэкземплярных особенностей каждого бортового генератора [1], что и является основой идентификации. При этом следует отметить, что процесс идентификации условно можно разделить на два этапа: первый этап связан с решением задачи обоснования моделей и алгоритмов обработки (оценивания), а также второй этап, предполагающий классификацию результатов обработки (оценивания).

Целью данной статьи является разработка и обоснование алгоритмов идентификации КА по НКИ аппаратуры бортового РТК.

Математическая постановка задачи идентификации КА. Условно источники нестабильностей частоты БРТК можно классифицировать по следующим, нижеперечисленным признакам [1, 3].

1. *Систематические изменения частоты*, вызываемые уходами или дрейфами. Эти изменения происходят за счет старения материала резонатора и являются чрезвычайно медленными. Их называют также “долговременной” нестабильностью, оценивают относительным изменением частоты в час, сутки, месяц или год в зависимости от типа устройства или характера применения.

2. *Детерминированные периодические отклонения частоты*, возникающие вследствие паразитной частотной модуляции сторонними процессами, например за счет нестабильности источников питания, наводок, изменения температуры, вибрации, давления и т.п.

3. *Изменения частоты за счет случайных флуктуаций*, обусловленные применением в аппаратуре электронных компонентов. Соответствующие флуктуации частоты называют “кратковременной” нестабильностью.

Процесс нестабильности, характеризуемый уходами фазы $\varphi(t)$, имеет вид [3]

$$\varphi(t) = g(t) + m(t) + n(t) . \quad (1)$$

Основным отличием слагаемого $g(t)$ процесса (1) является его весьма медленное изменение на интервале наблюдения. Поэтому целесообразно считать его постоянным на этом интервале и не рассматривать в анализе моделей нестабильности. Составляющая $m(t)$ процесса (1) – локально стационарный процесс с достаточно большим временем корреляции.

Компонента процесса $n(t)$ процесса (1) описывает быстрые флуктуации изменений фазы во времени, наиболее информативные в плане выявления особенностей задающих генераторов. Более высокая информативность $n(t)$ по сравнению с $m(t)$ обусловлена наличием в компоненте $m(t)$ соответствующих неизвестного доплеровского сдвига частоты. Наличие доплеровского сдвига часто приводит к невозможности идентификации генераторов по компоненте $m(t)$.

Практика исследования стационарных быстро флуктуирующих процессов, подобных $n(t)$, показывает высокую эффективность применения для их описания авторегрессионных моделей. Поэтому в дальнейшем

описание и анализ компоненты $n(t)$ будет проводиться в терминах авторегрессионных моделей:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + e_1(t); \quad n(t) = e_1(t) + e_2(t), \quad (2)$$

где $e_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i n(t-i) + e_1(t)$ – порождающий шум; $e_2(t) = e_1(t) - \sum_{i=1}^n a_i e_2(t)$ – белый шум измерений; $y(t)$ – процесс изменения фазы колебания, вызванный слабо коррелированной компонентой нестабильности; a_i – коэффициенты авторегрессионной модели.

Используем соотношения (2) при

$$M[e_1(t)] = 0, E[e_1(t)e_1(s)] = G_1^2(t)\delta(t-1)$$

по изменениям фазы сигнала $n(t)$ вида

$$n(t) = y(t) + e_2(t), \quad t = -p+1, \dots, 0, \dots, n, \quad (3)$$

где $e_2(t)$ – случайный шум измерений.

Подставляя (2) в (3), получим регрессионное соотношение

$$n(t) = \sum_{i=1}^p a_i n(t-i) + e_1(t) - \sum_{i=1}^p a_i e_2(t-i) = N^T(t)a + e_1(t) + e_2(t) - v^T(t)a, \quad (4)$$

где $N(t) = \{n(t-1), \dots, n(t-p)\}^T$; $a = (a_1, \dots, a_p)^T$; $v(t) = \{e_2(t-1), \dots, e_2(t-p)\}^T$.

Задача оценивания параметров a_1, \dots, a_p на основе (4) является задачей регрессионного анализа переменных и сводится к определению оценки решения некорректного стохастического алгебраического уравнения, требующей специальной регуляризации. Непосредственное применение МНК допустимо только в частом случае, когда процесс $e_2(t)$ удовлетворяет условию белого шума невязок [5]. Пусть выполнены условия:

1) процесс $y(t)$ удовлетворяет *условию стационарности*, т.е. случайный процесс $e_k(t)$, $k = 1, 2$ удовлетворяет условиям:

$$M[e_k(t+1)/e_k(t), e_k(t-1), \dots] = 0; \quad M[e_k^2(t+1)/e_k(t), e_k(t-1), \dots] \leq k < \infty;$$

2) процессы $e_1(t)$ и $e_2(t)$ *статистически независимы*.

Тогда из сделанных предположений следует конечность средних дисперсий

$$\bar{G}_k^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_k^2(i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G e_k^2(i),$$

где $G_k^2(i) = M[e_k^2(i)]$ – так называемая “текущая” дисперсия, а также эргодичность процессов $e_1(t)$ и $e_2(t)$ по вторым моментам.

Определим оценку \hat{a}_n неизвестного параметра, а из условия минимума суммы взвешенных квадратов [5]: $\hat{a}_n = \arg \min \omega^{-1}(a) \sum_{i=1}^n [n(i) - v^T(i)a]$.

Такая оценка является сильно состоятельной, т.е. $\hat{a}_n \rightarrow a$ при $n \rightarrow \infty$, и представляет собой модификацию обычной оценки МНК $\hat{a}_n = [v^T v - \beta_n^* I]^{-1} v^T N$, где $v = \{v(1), \dots, v(n)\}^T$; $N = (n_1, \dots, n_n)^T$. При этом в качестве оптимального значения параметра регуляризации β_n^* выступает наименьший положительный корень уравнения

$$\Lambda_n(\beta_n) = N^T N - (1 - \mu) \beta_n^* - N^T N (N^T N - \beta_n^*)^{-1} N^T N = 0.$$

Доказано, что все корни этого уравнения неотрицательны и с вероятностью 1 при $n \rightarrow \infty$ существует единственный корень β_n^* , принадлежащий промежутку $[0, \lambda_{\min}]$, где λ_{\min} – наименьшее собственное число матрицы $Y^T Y$. Для нахождения β_n^* обосновано применение метода Ньютона

$$\beta_n^*(k+1) = \beta_n^*(k) - \left\{ \Lambda_n \left[\beta_n^*(k) \right] \right\} / \left[\Lambda_n'(\beta_n^*(k)) \right]$$

с близким к 0 начальным значением $\beta_n^*(0)$, для которого $\Lambda_n[\beta_n^*(0)] \leq 0$. Результаты численных исследований показывают, что с ростом μ (т.е. с увеличением дисперсии фоновый шума) оценки на основе классического МНК приобретают значительное и растущее смещение (до 80 % при $\mu = 0,25$); в то время как свойства регуляризованных оценок ухудшаются достаточно медленно (смещение при $\mu = 0,25$ не превосходит 4 – 5%).

Разработанная методика идентификации КА получила подтверждение при эксплуатации КА “Салют-7”, “Астрон” и “Гранат”. Для экспериментов были отведены 20 сеансов по КА “Астрон” и 5 сеансов по КА “Гранат”.

Порядок измерения ухода частоты неконтролируемого излучения был следующим. Сигнал с выхода антенной установки поступал на входной усилитель высокой частоты (МШУ), и затем в гетеродинной части широкополосного приемника преобразовывался к частоте 10 МГц \pm 5 Гц. Для преобразования входного сигнала сигнал промежуточной частоты с точностью \pm 5 Гц проводились предварительные расчеты доплеровского сдвига частоты входного сигнала по предварительным целеуказаниям. Входной сигнал поступает на узкополосный приемник, проходит через один из десяти узкополосных кварцевых фильтров. По-

лоса пропускания каждого фильтра равна 1 Гц. Центральные частоты фильтров отличались на 1 Гц. Для обеспечения настройки фильтров с заданной точностью применялась достаточно сложная схема переноса сигнала $10 \text{ МГц} \pm 5 \text{ Гц}$ на более низкие (до 500 ... 1000 Гц) частоты и последующего обратного преобразования на частоту 10 МГц. Значение частоты, равное 10 МГц, выбиралось, исходя из требований точности измерений нестабильности и возможностей аппаратуры.

Выводы. Экспериментальные исследования показали на высокую эффективность функционирования системы идентификации в составе единого РТК НАКУ КА. При этом разработанные метод и алгоритмы его реализующие идентификации космических аппаратов, в том числе алгоритмы робастного фильтра с конечной памятью и выбора оптимального размера “скользящего окна” для полиномиальной оценки состояний применялись в качестве программно-аппаратного комплекса идентификации космических объектов ближнего космоса “Салют-7”, среднего космоса “Астрон” и “Гранат”. Применение указанных результатов позволило расширить функциональные возможности РТК “Квант-Д” для решения задач контроля космического пространства и наземного пункта контроля работоспособности КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кварцевые и квантовые меры частоты / Е.Н. Базаров, Н.А. Демидов, Е.Т. Жуков и др. Под ред. Б.И. Макаренко. – М.: МО СССР, 1989. – 536 с.*
2. *Козелков С.В., Стадченко В.Г., Нюкин Н.В., Шурыгин С.В. К вопросу о создании комплекса идентификации космических аппаратов // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1998. – Вып. 3 (11). – С. 103 – 106.*
3. *Козелков С.В. Идентификация космических аппаратов по неконтролируемым излучениям // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 1 (7). – С. 169 – 172.*
4. *Козелков С.В. Математическая модель идентифицируемых процессов бортовой аппаратуры космического аппарата // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вып. 2 (8). – С. 95 – 102.*
5. *Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложение / Пер. с англ. под. ред. А.М. Яглома, т.1. – М.: Мир, 1972. – 603 с.*

Поступила 4.02.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.И. Карпенко,
Харьковский университет Воздушных Сил.